

Exergie 概念을 利用한 冷凍機의

運轉條件의 最適化문제

皇甫漢* 李昌浩** 鄭泰克***

1. 서 언

近年에 冷凍食品工業의 發達에 따라 國內에서 大, 小 冷凍機가 製作 普及되고 있는데 그 대부분이 多 市販인 피스톤 往復形壓縮機이다. 이 壓縮機를 비롯하여 市販되는 國產 冷凍機의 附屬品은 대개 主物시설의 빈약으로 強度의 未達과 機械工作이 不正確하여 그 壽命이 짧고 이들로 組立된 冷凍裝置의 效率은 아주 좋지 못하다. 特히 冷凍機를 選擇할때 그 冷凍機性能이 試驗된 資料가 없기 때문에 수요자들은 곤란을 느낀다.

本文中에서는 大邱大學 化工科에 설치한 國產 5톤 2
시린다壓縮式 암모니아 冷凍機로 試驗하고 (그림 2)
冷凍 各 工序에 exergie 概念을 應用하여 工學的
熱損失 즉 Anergie를 計算하였다.

最近 Z. Rant ¹⁾에 의하여 周圍狀況이나 非可逆性を 포함하는 工程에서 工業적으로 利用 可能한 最大의 에

너지에 對해 *exergie* 라는 말이 提唱되어 Bosnjaković¹²⁾, Baehr¹³⁾ 등에 依해서 工業의인 工程에 해석 檢討가 시도되었다. 어떤 工學的인 現象이 高溫의 熱에너지源에서 低熱源으로 일어날때, 우리는 熱工程을 通하여 有用한 일을 얻는다. 이때 工程中 損失에너지를 알면 어느정도 經濟性을 판단할 수 있는 것이다. 또한 冷凍機의 運轉條件(운전압력, 冷却水流量等)의 變更에 따르는 實在成績係數와 動力소모량을 계산하고 最 經濟적 조건을 조사하였다.

2 實驗

實驗裝置는 그림 1에 表示한 바와 같이 一般 製氷用 냉동기 시설外에 冷凍機의 外部特性을 조사할 目的으로 brine tank 내의 鹽化칼슘을 一定流量으로 連續으로 流出入할 수 있도록 外部에 電氣加熱장치가 든 sole tank 를 두었다. 또 그림 1에 表示한 바와 같이 冷凍工

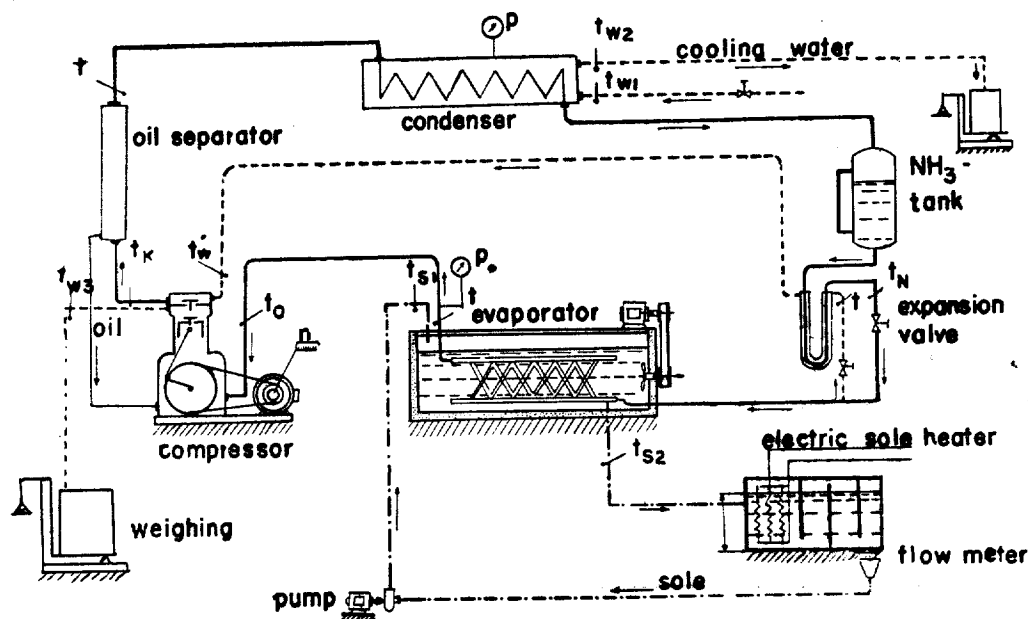


Fig. 1. Scheme of refrigerating processes

* * * * 大邱大學 化學工學科

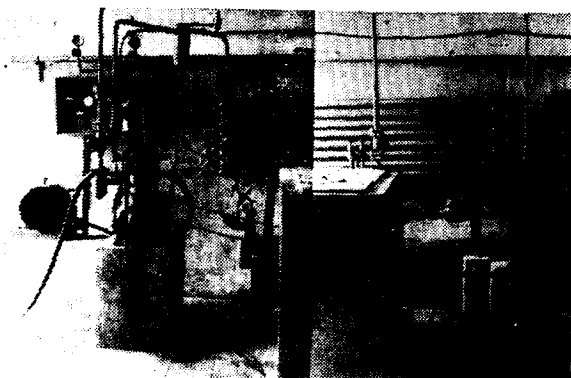


Fig. 2.

程 各部分의 溫度를 測定할 수 있도록 流管內에 알콜 溫度計를 삽입토록 되어있다.

冷凍機의 運轉은 실험시작 數時間 前부터 실험조건과 同一한 負荷에서 連續的 運轉을 시켜 定常狀態가 되면 實驗을 한다. 實驗은 底壓을 1.5kg/cm^2 , 2.0kg/cm^2 , 2.5kg/cm^2 으로 變更시키고, 各壓力에 따라 냉각수의 流量을 變更시켜 가면서 各部分의 溫度와 高壓 電力 소모량을 測定하였다. 實驗中 各부분의 測定値는 表 1 에 주었다.

표 1. 運轉條件에 따르는 各 測定值

P_0	kg/cm ²	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0	2.5	2.5	2.5
P	kg/cm ²	12	12.4	13	12.4	9.05	11.5	13	12.8	12.1
t_h	°C	64.9	66.5	69.8	70.8	59.5	64.5	72.5	72.5	63.1
t	°C	54.9	55.7	59.5	61.5	54	58.5	68.5	68	32.7
t_N	°C	28	28	28.8	28.7	19	19.8	30.5	33.8	30
t_{w1}	°C	4.9	4.6	4	-1.3	0	-0.5	0	-2	-2.4
t_{w2}	°C	23	27.8	27.3	28.3	14.5	16.4	24	24	23.8
t_{w3}	°C	29.9	30.5	32.3	30.5	21	23	32.8	32	31.5
t_{w3}	°C	33.5	31.7	34	31.5	21.4	25.8	33.9	31.9	31
W_w	kg/hr	2,660	1,308	756	2,400	1,104	498	2,400	2,000	900
E	kw/hr	3	3.12	3.36	3.6	3.83	4.36	4.15	4.2	4.44

3. 理 論

3-1. Exergie의 概念

工學의 일은* 可逆過程이 유지될때 最大가 되므로 그림 3에서 A의 상태에서 U의 狀態로 移動하는 과정에서는 A에서 단열가역의으로 B에 移行하고 B에서 等溫可逆의으로 操作할 때 全 工學의 일이 最大가 되는 것이다.

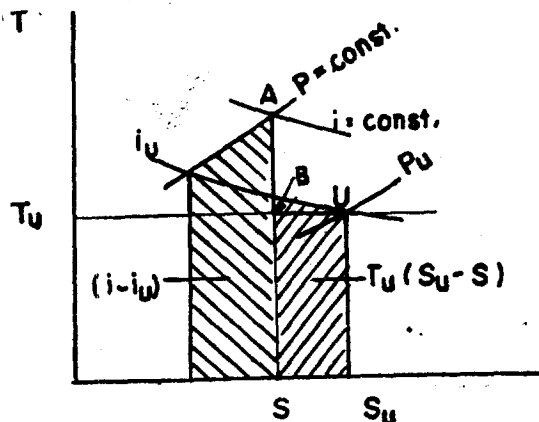


Fig. 3. Exergie in T-S diagram

* Technische Arbeit

만일 運動 및 位置에너지량을 고려하지 않으면 이 工程에서 工學的인 最大 일량이 곧 Exergie(e)가 되고 다음과 같이 定義되고 그림 3의 T-S線圖에 表示하면 斜線을 한 두 面積의 和가 된다.

$$e = i - i_u - T_u(s - s_u) \quad (1)$$

3-2. 冷凍機 各 프로세스의 Exergie 損失의 計算

예를들면 蒸發溫度 -2°C , 凝縮溫度 30°C 에서 壓縮機의 斷熱效率 $\eta = 0.78$ 이라 할때, 周圍溫도와 같은 溫度 15°C 1at.에서 물을 製氷의 原水와 冷却水로 使用해서 每時 1t의 氷을 만든다.

0°C 의 얼음을 만드는 熱量 Q_0 는 얼음의 양, 潛熱 및 물의 比熱을 各各 m_E , r_E , c_W 라 하면

$$Q_0 = m_E(i_{W_u} - i_E) = m_E[c_W(t_U - t_E) + r_E] \quad (2)$$

이 얼음의 엑세르기 e_E 는

$$e_E = i_E - i_{W_u} - T_U(s_E - s_{W_u}) = -r_E + c_W(t_E - t_U) - T_U\left(\frac{-r_E}{T_E} + c_W \ln \frac{T_E}{T_U}\right) \quad (3)$$

(3) 式을 整理하여

$$e_E = r_E \left(\frac{T_U}{T_E} - 1\right) - c_W(t_U - t_E - T_U \ln \frac{T_U}{T_E}) \quad (4)$$

1時間의 製氷 엑세르기 E_E 는 다음과 같다.

$$E_E = m_E e_E \quad (5)$$

冷凍機의 冷媒의 엑세르지는 各 部分의 온도, 압력, Entropy 를 求해서 (1)式으로 求한다.

여기서 冷媒流量 m , 全體의 일량을 W_t 라 하면

$$m = \frac{Q_0}{i_1 - i_4} \text{가 되고} \quad (6)$$

$$W_t = m \cdot w_t = m(i_2 - i_1) \quad (7)$$

가 된다.

3-3. 冷凍機의 成績係數와 엑세르지

冷凍機의 成績係數 ϵ_k 는 一般으로 凝縮熱量 Q 와 蒸發熱量 Q_0 의 冷凍機로써 W_t 의 일을 할 때 $\epsilon_k = Q_0 / |W_t|$ 로써 表示한다. 여기서 周圍溫度 T_U , 熱量 Q_0 에 對한 最大일량 A_{Q_0} 는 Carnot factor γ_C 로써 表示하면

$$A_{Q_0} = \gamma_C \cdot Q_0 = \left(1 - \frac{T_U}{T_0}\right) Q_0 \quad (8)$$

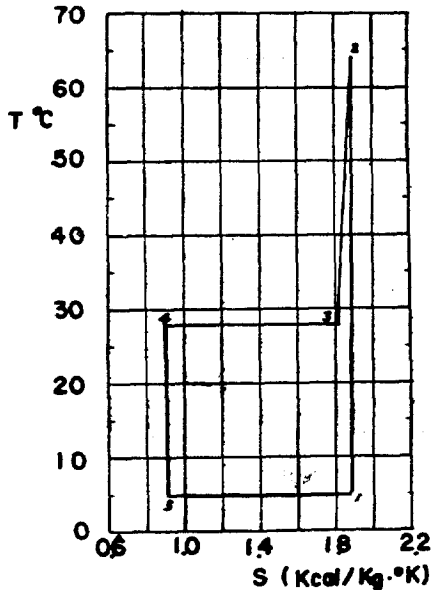


Fig. 5. T-S diagram of refrigerating processes (NH₃, p₀=2.5at.)

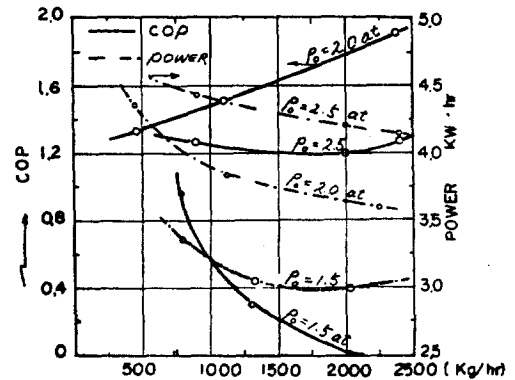
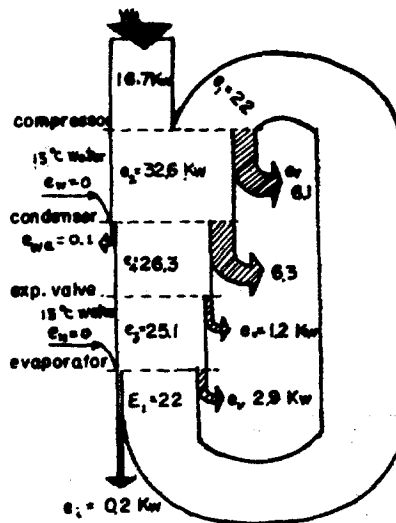


Fig. 4. COP-POWER Consumption flow-rate of cooling water



되고, 實際의 冷凍機는 엑세르지 損失 $T_U \Delta S_{irr}$ 가 있으므로 工學的 일량 (W_t)는

$$|W_t| = A_{Q_0} + e_v = \frac{T_U - T_0}{T_0} |Q_0| + T_U \Delta S_{irr} \quad (9)$$

이때의 成績係數 ϵ_k 는

$$\epsilon_k = \frac{|Q_0|}{|W_t|} = \frac{T_0}{T_U - T_0} \left(1 - \frac{T_U \Delta S_{irr}}{|W_t|}\right) \quad (10)$$

가 된다.

4. 計算 및 結果

表-2에 주어진 운전조건에 따라 제빙시 실험에 사용한 압모니아 냉동기의 各 process의 exergie 計算은 (1)과 (4)式에 의해서 구하여 그림 5, 6, 7에

표 2. 冷凍機 各 Process의 Exergie 值

위 치	t °C	P kg/cm ²	i kcal/kg·°K	s kcal/kg·°K	e kcal/kg	e KJ/kg	E kw/h
1	4.9	1.5	402.8	2.0875	54.1	227	22.0
2	64.9	12.0	430.0	2.090	80.4	336	32.6
2'	62.2	12.0	429.0	2.0875	80.3	335	32.5
4	28.0	12.0	131.5	1.1090	64.8	271	26.3
5	4.9	1.5	131.5	1.1150	61.8	259	25.1
1	4.6	1.5	402.7	2.0862	53.5	224	22.5
2	66.5	12.4	431.0	2.0890	81.7	341	34.2
2'	63.2	12.4	429.0	2.0862	80.5	336	33.9
4	28.0	12.4	131.5	1.1124	60.8	265	25.6
5	4.6	1.5	131.5	1.1160	60.3	262	25.4

1	4.0	1.5	402.6	2.0919	52.1	218	21.3
2	69.8	13.0	442.0	2.0920	91.5	384	37.3
2'	66.2	13.0	435.0	2.0919	84.5	355	34.5
4	28.8	13.0	132.6	1.1124	66.9	280	27.2
5	4.0	1.5	132.6	1.1210	64.9	272	26.4
1	-1.3	2.0	401.0	2.1075	46.6	194	19.4
2	70.8	12.4	442.0	2.1082	86.5	365	35.6
2'	68.0	12.4	431.0	2.1075	76.3	321	31.2
4	28.7	12.4	132.6	1.1123	62.9	259	25.7
5	-1.3	2.0	132.6	1.1175	61.9	192	25.3
1	0	2.0	401.5	2.1045	47.8	200	18.8
2	59.5	8.05	434.0	2.1050	69.4	291	27.3
2'	57.6	8.05	420.0	2.1045	66.3	274	26.1
4	19.0	8.05	121.2	1.0748	65.8	276	25.9
5	0	2.0	121.2	1.0872	61.1	252	23.6
1	-0.5	2.0	401.3	2.1062	46.9	196	18.5
2	64.5	9.8	433.0	2.1150	70.5	296	27.7
2'	62.0	9.8	422.4	2.1062	66.8	278	26.3
4	19.8	9.8	122.4	1.0783	66.7	277	26.2
5	-0.5	2.0	122.4	1.089	61.3	265	24.7
1	0	2.5	401.5	2.1040	47.9	201	19.6
2	72.5	13.0	440.0	2.1103	86.5	362	35.6
2'	68.2	13.0	431.0	2.1040	81.8	343	33.6
4	30.5	13.0	134.6	1.1101	64.3	269	26.5
5	0	2.5	134.6	1.130	61.3	257	25.2
1	-2.0	2.5	401.0	2.1103	44.9	187	18.1
2	72.5	12.8	438.0	2.1215	78.3	345	32.3
2'	68.5	12.8	432.0	2.1103	76.3	336	31.4
4	30.8	12.8	135.0	1.1192	67.3	282	27.2
5	-2.0	2.5	135.0	1.1320	60.8	254	24.0
1	-2.4	2.5	400.9	2.1107	45.2	210	19.0
2	63.1	12.1	437	2.1202	78.4	381	32.3
2'	62.5	12.1	432	2.1107	76.3	346	31.3
4	30.0	12.1	133.8	1.1165	64.2	292	26.4
5	-2.4	2.5	133.8	1.1420	58.2	265	24.0

T-S diagram 과 Exergie-diagram으로 表示하였고 그 값은 表 2에 주었다.

Exergie flow diagram에 나타난 全 exergie 손실을 합하여 $T \cdot \Delta S_{irr}$ 을 구하고 (10)式을 利用하여 實際 各 process의 成績係數를 求하여 表 3에 주었다.

그림 4는 冷却水の 流量과 低壓의 變更에 따라 成績係數와 電力 소비량을 나타낸다.

5. 結 論

國產 5t 壓縮式 암모니아 冷凍機의 各 프로세스를 예제르기 概念을 利用하여 損失일을 결정하였다.

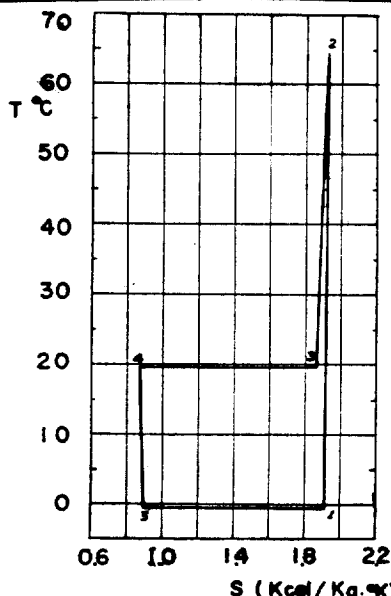


Fig. 6. T-S diagram of refrigerating processes (NH_3 , $p_0 = 2.0 \text{ at.}$)

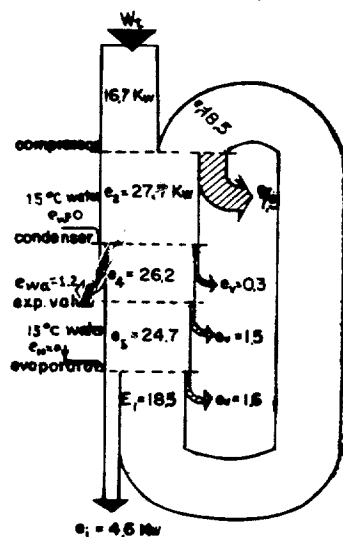


Fig. 6'. Exergie flow of the processes

一定한 壓力下에서 운전할때 動力所要量은 냉각수 流量의 増加에 따라 감소한다(그림 4 참조). 또 動力소요는 냉동기의 低壓部가 上昇하면 더 増加한다.

動力所要와 成績係數를 고려하면 이 냉동기의 最適稼動조건은 低壓部가 $p_0=2.0 \text{ kg/cm}^2$ 이고 냉각수 流量이 増加할수록 좋으나 냉각수의 費用이 그 限界가 된다.

특히 壓縮機에서 exergie 損失이 큰 것을 보면 피스톤부의 냉각이 理想의이 못된다.

참고 문헌

- (1) Z. Rant, Forschung, 22---1 (1956) 36.

Fig. 7. T-S diagram of refrigerating processes(HN 3, $P_0=1.5 \text{ at}$).

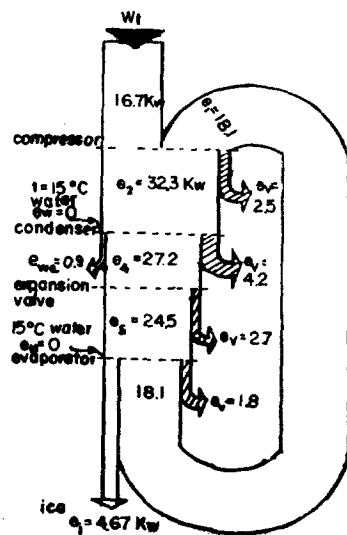
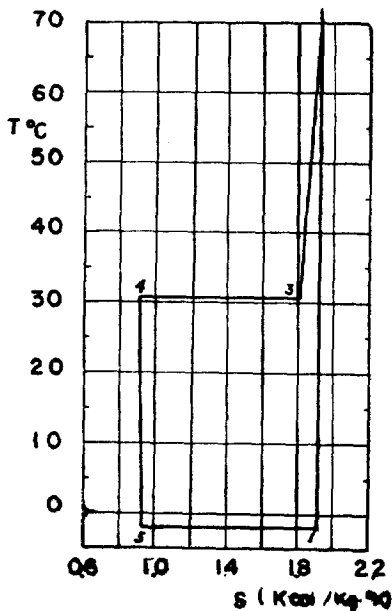


Fig. 7'. Exergie flow of the processes.

표 3. Cop-전력소요량-냉각수유량의 관계

저 압	냉각수유량	전력소비량	C O P	
kg/cm ²	kg/hr	kWH	이론 cop	실제 cop
1.5	2,060	3.00	4.66	0.056
1.5	1,308	3.12	4.47	0.308
1.5	756	3.36	4.25	0.960
2.0	2,400	3.6	3.77	0.860
2.0	1,104	3.83	4.56	1.053
2.0	498	4.36	4.12	1.340
2.5	2,400	4.15	3.76	1.220
2.5	2,000	4.2	3.85	1.200
2.5	900	4.44	3.18	1.260

- (2) F. Bosnjakovici, B. W. K, 13-11 (1961), 481.
 (3) H. D. Baehr, B. W. K, 17-1 (1965), 1.
 (4) 長谷川唐, J. J. S. M. E. vol. 69, No. 570, p. 912.